第 37 卷第 19 期 2017 年 10 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.19 Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607111414

贺美,王立刚,朱平,戚瑞敏,王迎春.长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化.生态学报,2017,37(19):6379-6389.

He M,Wang L G,Zhu P,Qi R M,Wang Y C.Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil.Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6379-6389.

长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化

贺 美[1],王立刚[1],朱 平[2],戚瑞敏[1],王迎春[1,*]

1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

2 吉林省农业科学院农业环境与资源研究所, 长春 130033

摘要:黑土作为承担我国粮食安全与生态安全的重要土壤资源,其碳排放特征与碳库组分变化一直是生态学领域研究的热点。施肥是影响黑土有机碳输入、输出的重要因素,而这需要长时间尺度的探究。为明确长期不同施肥下的土壤碳排放特征及其影响机制,以始于 1990 年的国家土壤肥力与肥料效益监测网站黑土监测基地-公主岭为研究平台,选取不施肥(CK)、单施氮磷钾肥(NPK)、无机肥配施低量有机肥(NPKM1)、1.5 倍的无机肥配施低量有机肥(1.5(NPKM1))、无机肥配施高量有机肥(NPKM2)和无机肥配施秸秆(NPKS)6 个处理,探讨了长期不同施肥下土壤碳排放量(CO_2-C)与土壤碳库组分包括水溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)及其 β-葡萄糖苷酶(BG)、木聚糖酶(BXYL)、纤维素酶(CBH)和乙酰基 β-葡萄糖胺酶(NAG)等酶活性变化。结果表明:与 CK 相比,各施肥处理均可以显著增加黑土土壤碳排放量($P<0.05$),其中,NPK 处理土壤碳排放量约为 2633.33 kg/hm^2,显著高出 CK 处理 37.36%;长期有机无机配施(NPKM1、1.5(NPKM1)、NPKM2)显著增加土壤碳排放量 71.81%—88.51%,效果最为明显;NPKS 显著增加土壤碳排放量 56.32%,并且三种长期有机无机配施措施碳排放差异不显著。相对 CK 处理,有机无机配施的 DOC、MBC、POC、ROC 均有显著增加($P<0.05$),各指标分别高出 CK 处理 16.07%—56.34%、128.84%—185.77 %、284.15%—497.45%和 841.03%—1145.94%,其中 1.5(NPKM1)处理效果最好。同时,有机无机配施相对 CK 处理的 NAG、BG、BXYL 和 CBH 活性分别提高了 313.22%—452.65%、129.45%—250.74%、159.08%—273.32%和 72.21%—193.53%,且以 1.5(NPKM1)处理的效果最好。土壤碳排放量与土壤酶活性、土壤活性碳库组分之间的相关性分析结果表明,长期不同施肥措施的土壤碳排放量不但与土壤 ROC、DOC、POC、MBC 含量呈极显著相关($P<0.001$),也与土壤 BG、NAG、CBH、BXYL 酶活性呈极显著相关($P<0.001$),说明施肥可以通过改变土壤各活性碳库组分含量与土壤微生物活性影响土壤碳排放量。

关键词:长期施肥;土壤碳排放量;土壤活性碳库组分;土壤酶活性

Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil

HE Mei[1],WANG Ligang[1],ZHU Ping[2],QI Ruimin[1],WANG Yingchun[1,*]

1 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*

2 *Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun* 130033, *China*

Abstract: As black soil is the important soil resources on bearing food security and ecological security in China, the carbon emission characteristics and carbon library components of it has always been a hotspot in research of ecology. Fertilization is the important factors influencing the black soil organic carbon input as well as its output, and the effect under fertilization

基金项目:公益性行业(农业)科研专项东北地区黑土保育及有机质提升关键技术研究与示范(201303126-2)

收稿日期:2016-07-11; **网络出版日期**:2017-05-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangyingchun@ caas.cn.

need long time scales of inquiry. Our experiments were carried out in National Fertility Monitoring Net in Gongzhuling City began in 1990, we intended to clarify the soil carbon emissions and its mechanism under long-term different fertilization. Six of the fertilization treatments were chosen including: no fertilizer (CK), only chemical fertilizer application (NPK), combining chemical and low levels of organic manure (NPKM1), 1.5 times the amount of inorganic and organic fertilizer of NPKM1 (1.5 (NPKM1)), combing chemical and high amounts of organic manure (NPKM2), and inorganic fertilizer straw (NPKS), to analyze the changes in soil carbon dioxide emissions (CO_2-C) and the soil carbon library included dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC), readily oxidized organic carbon (ROC), soil enzyme activity beta glycosidase enzymes (BG), β-xylosidase (BXYL), cellulose (CBH), and acetyl beta glucosamine enzyme (NAG). The results showed that compared with CK, all kinds of fertilizer processing can significantly increase the chernozem soil carbon emissions ($P<0.05$), and among these processing types, NPK carbon emissions is about 2633.33 kg/hm^2, significantly higher than the CK treatment by 37.36%. NPKM1, 1.5 (NPKM1), NPKM2 significantly increased soil carbon emissions by 71.81%—88.51%, and the effect was best; NPKS significantly increased soil carbon emissions by 56.32%, and three kinds of long-term organic and inorganic fertilization treatments had no significant difference. Relative to CK, NPKM1, 1.5 (NPKM1) and NPKM2 increased the DOC content by 16.07%—56.34%, enhanced MBC content by 128.84%—185.77%, improved POC content by 128.84%—497.45%, and increased ROC content by 841.03%—1145.94% content significantly ($P<0.05$), respectively, the effect of 1.5 (NPKM1) was the best. At the same time, organic and inorganic fertilization treatments can increase NAG, BG, BXYL, and CBH activity by 313.22%—452.65%, 313.22%—250.74%, 159.08%—273.32%, and 72.21%—273.32%, and the effect of 1.5 (NPKM1) is also the best here. Soil carbon emissions were significantly correlated with soil activity and soil enzyme activity ($P<0.001$), shows that fertilization could change the composition content of soil carbon library and soil microbial activity, which resulted in the difference in the soil carbon emissions.

Key Words: long-term fertilization; soil carbon emissions; soil carbon library components; soil enzyme activity

土壤呼吸是土壤碳输出的主要途径,每年因土壤呼吸而排放的碳约 50—75×10^{15} g[1],是化石燃料排放到大气的 10—15 倍[2]。土壤呼吸指土壤由于代谢作用而释放二氧化碳的过程,包括植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸 3 个生物学过程以及一个少量土壤有机物氧化产生二氧化碳的非生物学过程[3]。由于土壤释放二氧化碳是一个持续动态的过程,难以准确测定,因此,很多学者通过土壤呼吸速率来评估土壤二氧化碳排放量[4-8]。农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成成分,因频繁受种植、耕作与施肥等人为活动的强烈影响,其土壤呼吸在较短的时间尺度上会产生显著变化,据统计,农田生态系统 CO_2排放量达到人为温室气体排放量的 21%—25%[9]。因此,了解农田生态系统的土壤碳排放特征以及相关指标变化有助于准确评估其碳收支动态,对调控农田土壤碳循环、降低人为干扰对农田温室气体排放的负效应具有重要意义。

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中最活跃的部分,在一定程度上能够反映土壤的物质代谢强度、生物学特性以及土壤碳库的稳定性[10]。由于土壤有机碳背景值较高且其总量变化相对较慢,对农田管理措施的反应不够敏感,因此,为了更好的反映土壤有机碳的有效性,近些年来许多学者将活性有机碳组分包括微生物量碳、水溶性有机碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳等作为反映土壤肥力与质量变化的早期预测指标[11-14]。土壤酶参与土壤碳循环中的各种生物化学过程[15],酶活性的高低可以间接反映土壤碳素转化程度的强弱。不同施肥制度可以调节土壤碳库组分含量、影响土壤酶活性,研究表明[16-19],施用有机肥或者秸秆还田均能提高土壤酶活性,不同程度的增加土壤活性碳库组分含量,而土壤有机碳库及微生物活性均能显著影响土壤碳排放[20-21],但目前有关施用化肥对土壤碳库组分含量以及土壤酶活性的影响结论不一[22-25]。因此,明确长期施肥对土壤碳库与酶活性变化的影响尤为迫切。

长期以来,施肥为满足我国的粮食需求做出了突出贡献,然而,长期施肥后农田土壤理化及生物学性质均

有重大变化[26-29]。近年来我国学者在土壤温室气体排放、微生物学特性以及土壤碳库方面做了大量研究[30-32],但是由于我国长期定位试验监测较少,目前对长期施肥后东北黑土的碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化缺乏系统研究,本文以连续运行 26a 的国家黑土肥力与肥料效益监测基地公主岭长期定位试验为平台,探索长期不同肥料管理模式下土壤碳排放、土壤活性碳库与土壤酶活性的响应,以期为实现黑土区固碳减排和培肥地力等提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地位于国家黑土肥力与肥料效益监测基地吉林省公主岭市,成土母质为第四纪黄土状沉积物,地势平坦,是典型黑土区。年平均气温 4—5℃,4—5 月平均气温为 7—16℃,6—8 月份气温在 19—25℃,9 月份在 16℃左右,年最高气温 34℃,最低-35℃,有效积温在 2600—3000℃,年降水量 450—650 mm,年蒸发量 1200—1600 mm,无霜期 120—140 d,为一年一季雨养农业区。

试验从 1990 年开始,初始土壤(0—20 cm)的理化性状为:容重 1.19 g/cm^3,有机碳 13.2 g/kg,全氮 1.4 g/kg,有效磷 11.79 mg/kg,速效钾 158.33 mg/kg,pH 值是 7.6,田间持水量 35.8%,孔隙度 53.4%,粘粒含量(<0.02 mm)31%。种植模式为春玉米(*Zea mays L.*)连作,试验开始以来供试玉米品种分别是:1991—1994 年为丹玉 13;1995—1996 年是吉单 304;1997—1999 是吉单 209;2000—2003 是四密 25;2004—2005 是吉单 209;2006—2012 为郑单 958。

1.2　试验设计

本文选择长期定位试验的 6 个处理进行分析:1)对照处理不施肥 CK;2)单施化肥 NPK;3)化肥低量有机肥 NPKM1;4)1.5 倍的化肥低量有机肥 1.5NPKM1;5)化肥配施高量有机肥 NPKM2;6)化肥配施秸秆 NPKS,各处理施肥量见表 1。试验小区面积 400 m^2,该地的长期定位实验于 1990 年开始实施,但由于当时全国 9 个处理一致的长期定位实验均未设置重复,因此,考虑到这一点,在取样时将试验小区分成 3 个取样区分别取样。有机肥(M)为猪厩肥自 2005 年后换成牛粪,S 为玉米秸秆。各处理中磷钾肥播种前作为底肥一次性施入,氮肥 1/3 播种前用作底肥,2/3 于拔节期追施。有机无机配施处理中牛粪于玉米收获后施入地里,秸秆还田处理是将前一年的作物秸秆从田里移出,自然风干后经人工粉碎,于第 2 年 6 月下旬追肥时撒施于垄沟中,然后覆土。在收获时各处理地上留茬 15 cm,并同根茬一起还田。播种时间在每年 4 月 21 日—4 月 30 日,收获时间大约 9 月 21 日—9 月 30 日,生育期 150d 左右,种植密度为 6 万株/hm^2。

表 1　各处理施肥量

Table 1　The rate of fertilizer application of each treatment

处理 Treatment	N/(kg/hm^2)	P_2O_5/(kg/hm^2)	K_2O/(kg/hm^2)	有机肥 Manure/(t/hm^2)	秸秆 Straw/(t/hm^2)
CK	0	0	0	0	0
NPK	165	82.5	82.5	0	0
NPKM1	50	82.5	82.5	23	0
1.5(NPKM1)	75	123.75	123.75	34.5	0
NPKM2	165	82.5	82.5	30	0
NPKS	112.125	82.5	82.5	0	7.5

CK:不施肥 No fertilizer;NPK:单施氮磷钾肥 Only chemical fertilizer application;NPKM1:无机肥配施低量有机肥 Combining chemical and low levels of organic manure;1.5(NPKM1):1.5 倍的无机肥配施低量有机肥 1.5 times the amount of inorganic and organic fertilizer of NPKM1;NPKM2:无机肥配施高量有机肥 Combing chemical and high amounts of organic manure;NPKS:无机肥配施秸秆 Inorganic fertilizer straw;玉米秸秆和有机肥的 C:N 比分别是 66:1 和 26:1,含氮量是 7.0 g/kg 和 5.0g/kg

1.3　测定项目与方法

1.3.1　土壤养分的测定

于 2015 年 9 月 27 日作物收获后,采集 0—20cm 土层土样,将每处理分为 3 个取样小区,在每小区按梅花形

5 点法采集样品后带回实验室过筛混匀,用于土壤养分测定。水溶性有机碳(DOC)用 0.5mol/L K_2SO_4浸提后用总有机碳/总氮(TOC(Total organic carbon)/TN(Total nitrogen))自动分析仪(Multi N/C R205 3100,德国耶拿)测定[33];颗粒有机碳(POC)测定采用 5g/L 六偏磷酸钠分散法[34];微生物量碳(MBC)测定采用氯仿熏蒸浸提法[35],浸提液用 TOC/TN 自动分析仪测定;易氧化有机碳(ROC)测定采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法[36]。

1.3.2 土壤酶活性的测定

本研究中所涉及的 4 种土壤酶活性的测定均采用荧光微型板检测技术[37-38],采用 96 孔微型板分区法,分为缓冲液+缓冲液区、缓冲液+标准底物区、缓冲液+荧光底物区、待测液+缓冲液区、待测液+标准底物区、待测液+荧光底物区;其次为制备土壤悬浊液试剂:称取相当于 1 g 干土的鲜土,置于 200 mL 塑料瓶,加入灭菌并冷却的 50 mmol/L 醋酸缓冲液 120 mL,震荡制备成土壤悬浊液;然后将配置好的缓冲液以及待测液用 8 通道移液器按照顺序加入已经编号分区的微型板中,然后将配置好的标准底物加入微型板,迅速加入荧光底物溶液,将加好待测液、标准底物、荧光底物的微型板放入 25℃的培养箱培养,培养 4h 后上机测定。

1.3.3 土壤呼吸速率的测定与土壤 CO_2-C 排放量估算

土壤呼吸速率采用开路式土壤碳通量测量系统 Li-8100 红外气体分析仪(IRGA)测定。为了减少对土壤表层的干扰,避免由于安置 PVC 基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动,提前将测定土壤呼吸的 PVC 基座(直径 20 cm,高度 10 cm)埋入土壤中,每个基座上部距土壤表面 3 cm。本试验测定时间为 2015 年,具体测定日期见表 2,于每个测定日 9:00—11:00 进行,该段时间土壤温度相对稳定。每小区重复测定 3 次,求其平均值作为该次测量的土壤呼吸速率。作物生长当季降雨量与平均气温(来源于中国气象数据网 2015 年吉林省四平市气象站点数据)见图 1。土壤呼吸生育期累积 CO_2排放量的计算,公式为[7]:

$$X = R_s \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-5}$$

$$CO_2\text{-C}(kg/hm^2) = \sum_{i=first}^{n=last} X_i + X_{i+1} \times N + X_{i+2} \times N + \dots + X_{i+n} \times N$$

式中,X 为土壤每天 CO_2排放量(kg/hm^2),Rs 为测定的土壤呼吸速率($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$),12 为 CO_2-C 的摩尔质量(g/mol),3600 和 24 为换算系数。i 为第 1 次测定土壤呼吸速率,n 为最后一次监测值。N 是相邻两次监测之间相隔的天数,相邻两次土壤呼吸的线性内插作为间隔土壤呼吸速率值。

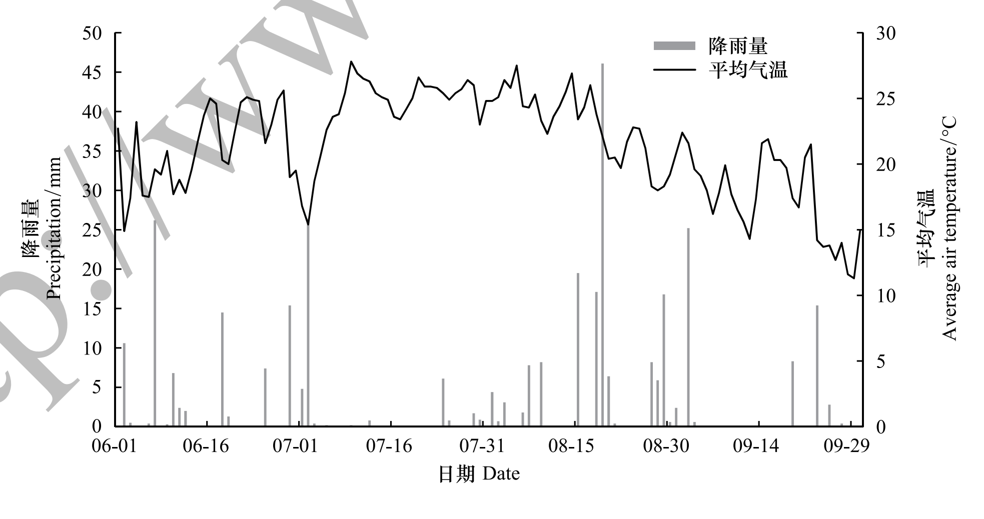


图 1 作物生长季降雨量与大气平均温度变化

Fig.1 The precipitation and average air temperature during the growth period of crops

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 9.1 软件进行处理和统计分析。

2　结果与分析

2.1　长期不同施肥对土壤碳累积排放量的影响

与不施肥相比,肥料管理措施对土壤碳累积排放量影响显著(图 2)。长期单施化肥条件下(NPK),玉米生育期黑土碳排放量约为 2633.33 kg/hm^2,显著高于 CK 处理 37.36%。无机肥配施有机肥和秸秆的处理显著高于 CK 处理 56.32%—86.54%,其中 1.5(NPKM1)和 NPKM2 的土壤碳排放量显著高于 NPKS 处理。

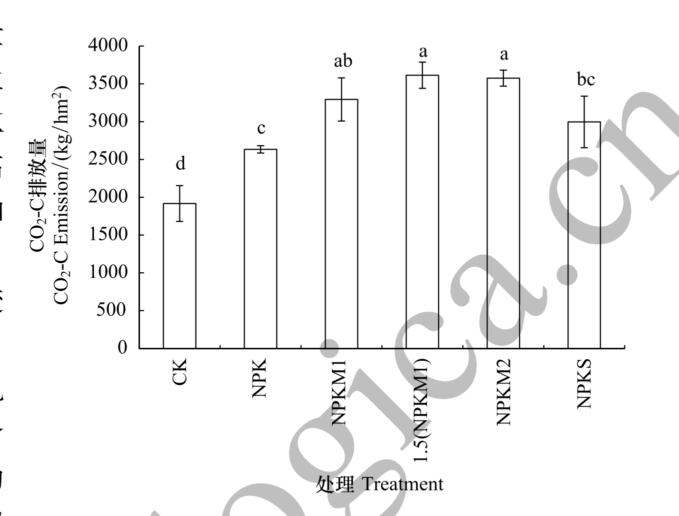


图 2　长期不同施肥措施下土壤碳累积排放特征

Fig.2　Changes in soil carbon cumulative emission characteristics under different fertilizer treatments

2.2　长期不同施肥措施下土壤活性有机碳库组分的变化特征

长期有机无机配施可以显著提高土壤可溶性有机碳含量(图 3),长期有机无机配施土壤可溶性有机碳含量增加了 16.08%—56.34%,其中 1.5(NPKM1)处理的可溶性有机碳含量最高,为 515.56 mg/kg;长期不施肥处理下的可溶性有机碳含量最低,为 329.76 mg/kg。

长期单施化肥和长期有机无机以及秸秆还田均能显著提高土壤微生物碳含量(图 3),1.5(NPKM1)处理的微生物量碳含量最高,为 327.91 mg/kg,长期单施氮磷钾显著提高土壤微生物碳含量 77.86%,长期有机无机配施和秸秆还田显著提高土壤微生物量碳128.84% —185.77%。

表 2　不同施肥措施下土壤呼吸速率变化/(μmol m^{-2} s^{-1})

Table 2　Changes in soil respiration rates under different fertilizer treatments

处理 Treatment	日期 Date												
	6—23	6—25	6—27	7—12	7—14	7—21	7—23	8—2	8—15	8—16	9—1	9—19	9—27
CK	2.44d	2.61b	3.2c	3.26b	2.81d	2.8c	2.21c	2.43d	2.6f	1.97d	2.05c	1.7c	0.93b
NPK	3.68cd	4.19ab	5.4b	4.03ab	3.32cd	3.1bc	2.81bc	3.43c	3.5e	2.58c	2.92b	2.3b	1.42b
NPKM1	6.08ab	4.89a	6.7ab	4.71a	3.51bc	3.5ab	3.25ab	4.43ab	4.4c	3.24b	4.30a	2.7b	2.07a
1.5(NPKM1)	6.18a	4.34a	7.7a	4.77a	4.15a	3.6ab	3.46ab	4.95a	5.0a	3.90a	4.52a	3.3a	2.03a
NPKM2	5.38ab	4.52a	7.8a	4.96a	4.22a	3.8a	3.86a	4.65a	4.9b	3.57ab	4.16a	3.8a	2.47a
NPKS	4.57bc	4.28ab	6.9ab	4.81a	4.07ab	3.2bc	3.10b	3.64bc	3.8d	2.78c	3.22b	2.7b	1.36b

同列不同字母表示处理间差异达 5%显著水平

长期有机无机配施能够显著提高土壤颗粒有机碳含量,结果如图 3 所示,1.5(NPKM1)、NPKM2 和 NPKM1 处理土壤颗粒有机碳含量显著高于 NPKS 处理 157.62%、169.63%和 73.37%,显著高于 NPK 处理 387.95%、410.70%和 228.37%,显著高出 CK 处理 470.84%、497.46%和 284.15%。

长期有机无机配施以及秸秆还田的施用能够显著提高土壤易氧化有机碳的含量,如图 3 所示,1.5(NPKM1)、NPKM2、NPKM1 和 NPKS 处理土壤易氧化有机碳含量显著高于 NPK 处理 659.90%、473.93%、522.81%和 371.61%,显著高于 CK 处理 1145.94%、841.03%、921.17%和 673.25%。

2.3　长期不同施肥措施下土壤酶活性的变化

不同施肥处理对土壤酶活性有较大的影响,所有处理中 β-葡萄糖苷酶(BG 酶)、木聚糖酶(BXYL 酶)、纤维素酶(CBH 酶)、乙酰基 β-葡萄糖胺酶(NAG 酶)4 种酶活性均以 1.5(NPKM1)处理最高,同一处理下的 4 种酶活性,以 BG 酶的活性最高,NAG 酶的活性最低。

长期有机无机配施和秸秆还田能够显著提高土壤 NAG 酶活性如图 3,表现为 1.5(NPKM1) > NPKM2 >

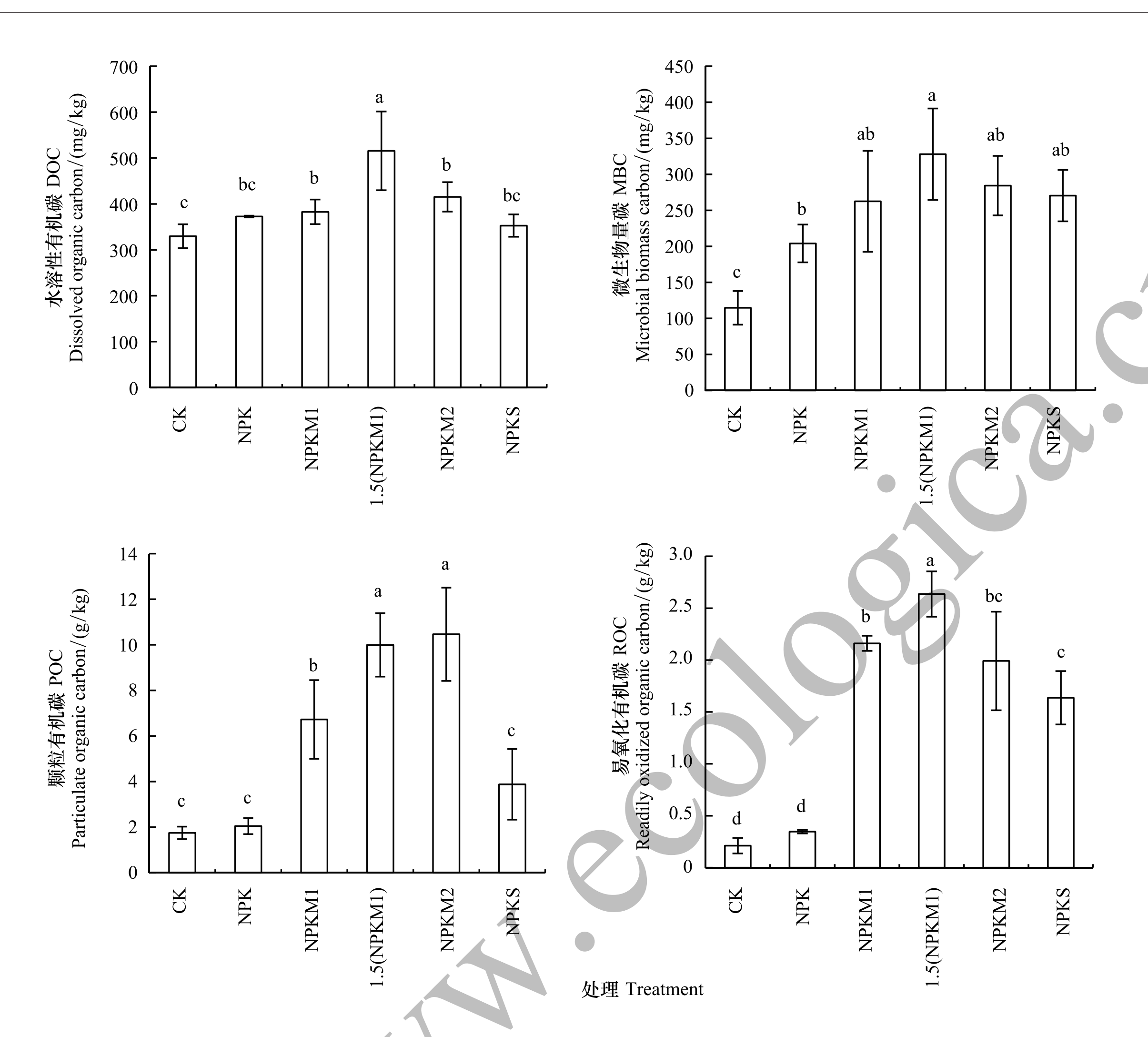


图 3 长期不同施肥措施下土壤活性有机碳库变化特征

Fig.3 Soil active organic carbon under long-term different fertilizer treatments

NPKM1 > NPKS > NPK > CK,其中 1.5(NPKM1)处理 NAG 酶活性为 37.39 nmol g^{-1} h^{-1}, 1.5(NPKM1)、NPKM2、NPKM1 和 NPKS 处理显著高于 NPK 处理 260.56%、179.60%、169.59%和 77.14%,显著高于 CK 处理 452.65%、328.56%、313.22%和 171.51%。

长期不同施肥均能显著提高土壤 CBH 酶活性,表现为 1.5(NPKM1)> NPKM2 > NPKS > NPKM1 > NPK > CK,其中 1.5(NPKM1)处理 CBH 酶活性为 58.19 nmol g^{-1} h^{-1},显著高于其余各处理,1.5(NPKM1)、NPKM2、NPKM1、NPKS 和 NPK 处理土壤 CBH 酶活性显著高于 CK 处理 193.53%、111.09%、72.21%、86.66% 和 38.29%。

长期施肥下土壤 BXYL 酶活性表现为 1.5(NPKM1)> NPKM2 > NPKS > NPKM1 > NPK > CK,其中 1.5(NPKM1)处理活性为 62.81nmol g^{-1} h^{-1},显著高于其余各处理;1.5(NPKM1)、NPKM2、NPKM1 和 NPKS 处理 CBH 酶活性显著高于 CK 处理 273.32%、189.98%、159.08%和 184.21%,NPK 处理土壤 CBH 酶活性显著高于 CK 处理 77.24%。

长期施肥下土壤 BG 酶活性表现为 1.5(NPKM1)> NPKM2 > NPKM1 > NPKS > NPK > CK,其中 1.5(NPKM1)处理活性为 257.36nmol g^{-1} h^{-1},3 个有机无机配施处理显著高于 NPKS 处理 45.16%—121.89%,显著高于 NPK 处理 45.67%—122.67%,显著高于 CK 处理 129.46%—250.74%。

2.4 土壤碳排放与活性有机碳以及土壤酶活性之间的相关性分析

对所有处理的土壤碳排放量与土壤酶活性以及土壤活性碳库组分之间的相关性进行了分析,结果如表 3

所示,长期不同施肥措施下的土壤碳排放量与土壤 ROC、DOC、POC、MBC 含量均呈极显著相关($P<0.001$),与土壤 BG、NAG、CBH、BXYL 酶活性之间也呈极显著相关($P<0.001$),可见土壤碳排放的总量受土壤各活性碳库组分含量与土壤微生物活性共同作用的影响。

3　讨论

3.1　长期不同施肥处理对土壤呼吸碳排放量的影响

不同的田间管理措施对土壤呼吸速率的影响很大[39],以致不同施肥处理间土壤碳排放量差异明显。施用有机肥和秸秆还田以及单施化肥均能提高土壤呼吸速率,秸秆还田能够为微生物提供足够的底物,并且秸秆切碎后翻埋入土能够降低土壤容重,增大土壤的总孔隙度,从而促进土壤好氧呼吸。有机肥还田直接增加土壤中微生物数量,同时为微生物提供能源,并且有机肥的常年施入也增加了往年的根茬还田量,有机无机配施下各土壤酶活性较高也说明土壤中物质周转速率以及微生物活性大,从而进一步促进土壤呼吸[40]。本试验结果略高于黄晶等[41]在红壤地对小麦-玉米轮作下得出的土壤呼吸碳累积量,推测是由不同的土壤类型、种植制度以及气候等差异所致。

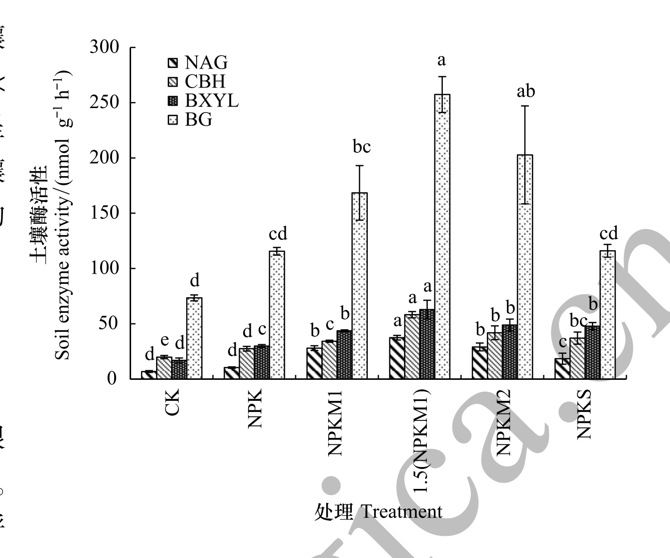


图 4　长期不同施肥措施下土壤酶活性

Fig.4　Soil enzyme activity under long-term different fertilizer treatments

BG 为 β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase);BXYL 为木聚糖酶(β-xylosidase);CBH 为纤维素酶(Cellobiohydrolase);NAG 为乙酰基 β-葡萄糖胺酶(N-acetylglucosaminnidase)

长期单施化肥土壤碳排放量显著高于长期不施肥处理,除土壤微生物量碳外其余碳库组分二者之间并无显著差异,可能是长期不施肥处理下每年根茬还田使得进入土壤中的植物残体增添了新鲜碳源,有效地补充了各活性碳库组分的损耗,但是由于不施肥处理植物生长代谢缓慢,使得占土壤呼吸 40%—64%[42]的根呼吸相对 NPK 处理较弱,并且 NPK 处理 4 种酶活性高于 CK 处理,其微生物活性强,以致整个生育期 NPK 处理土壤总碳排放量显著高于 CK 处理。

表 3　土壤碳排放与土壤活性有机碳库组分和土壤酶活性之间的相关性

Table 3　Correlation coefficients between soil dioxide carbon emissions and soil activity carbon as well as soil enzyme activity

指标 Indicators	CO_2-C Carbon dioxide-C	ROC Readily organic carbon	DOC Dissolved organic carbon	POC Particulate organic carbon	MBC Microbial biomass carbon	BG Beta blycosidase enzyme	NAG Acetyl beta glucosamine enzyme	CBH Cellulose enzyme	BXYL Beta xylosidase enzyme
CO_2-C	1.000	0.880**	0.664**	0.812**	0.824**	0.841**	0.900**	0.823**	0.874**
ROC		1.000	0.673**	0.809**	0.829**	0.858**	0.956**	0.859**	0.871**
DOC			1.000	0.701**	0.585*	0.810**	0.715**	0.795**	0.624**
POC				1.000	0.653**	0.819**	0.873**	0.793**	0.736**
MBC					1.000	0.809**	0.818**	0.821**	0.845**
BG						1.000	0.915**	0.873**	0.835**
NAG							1.000	0.906**	0.863**
CBH								1.000	0.884**
BXYL									1.000

CO_2-C:土壤二氧化碳-碳排放量 Carbon dioxide-C;ROC:易氧化有机碳 Readily organic carbon;DOC:水溶性有机碳 Dissolved organic carbon;POC:颗粒有机碳 Particulate organic carbon;MBC:微生物量 microbial biomass carbon;BG:β-葡萄糖苷酶 Beta glycosidase enzymes;NAG:乙酰基 β-葡萄糖胺酶 Acetyl beta glucosamine enzyme;CBH:纤维素酶 cellulose enzymes;BXYL:木聚糖酶,β-xylosidase;$r_{0.05}=0.468$,$r_{0.01}=0.590$,$n=18$;*表示显著相关,**表示极显著相关

3.2 长期不同施肥措施对活性碳库组分的影响

土壤的碳库组分可溶性有机碳、微生物量碳、颗粒有机碳及易氧化有机碳作为土壤微生物活性能源以及土壤养分的驱动力能够直接参与土壤的生物化学过程[43]。卜洪震[44]等对长期红壤稻田土壤微生物量碳的研究表明,与不施肥相比,高量有机肥配施、低量有机肥配施、秸秆还田下微生物量碳提高的比例分别是51.7%、41.9%和22.4%,梁尧等[45]发现,黑土经过6a单施化肥处理,土壤微生物量碳下降4%,水溶性有机碳没有显著变化,6a有机无机配施后土壤微生物量碳增加10%—46%,水溶性有机碳增加56%—85%,本试验中长期单施化肥下土壤微生物量碳和水溶性有机碳均有所提高,可能是由于根茬还田为土壤输入了新鲜碳源,长期有机无机配施和秸秆还田显著提高土壤微生物量碳128.84%—185.77%,推测可能是由于本试验中有机肥用量较高,极大地丰富了土壤中微生物的来源,有机无机配施对黑土活性碳库组分增加效果最好,有机肥的施用直接增加了土壤中的碳输入,提高土壤微生物的多样性与活性,进而控制土壤碳输入与输出的相对量,同时也通过增加植物的净生产量来刺激植物残体的降解[46-48],促进土壤活性碳库储量的增加。

3.3 长期不同施肥对土壤酶活性的影响

土壤中所有的生化反应都是在土壤酶的参与下完成的,土壤酶活性的高低能够反映土壤微生物的代谢强度,生化反应的进程和土壤肥力水平[49]。长期施肥下酶活性有增强、抑制和不变等效应[50-52],主要受不同土壤类型、施肥、耕作与轮作等田间管理以及种植年限的差异等影响表现出不同的变化趋势。本研究中长期化肥处理显著提高了土壤酶活性,可能是由于化肥中的无机氮在一定程度上调节了土壤碳氮比,为微生物的活动创造了良好的条件。本试验中长期有机无机配施和秸秆还田能够显著提高土壤酶活性,与前人结论相近[53-54],主要是有机肥料施入土壤后,即可带入丰富的微生物,同时又可以增加土壤养分和能源,势必会激发土壤的生物学活性,进而提高土壤酶活性[55-56]。BeKe等[57]研究表明秸秆腐解还田相对焚烧还田更能有效提高土壤酶活性,Perucci等[58]研究认为秸秆还田可以通过改变最大酶促反应速率(V_{max})促进土壤酶活性。本试验中秸秆还田下土壤酶活性低于有机无机配施处理,推测是由于不同还田物料下微生物群落结构差异所致。

3.4 土壤呼吸碳排放量与土壤活性有机碳组分以及土壤酶活性之间的相关性分析

研究土壤碳排放与土壤活性碳库之间的相关关系,可以确定各部分碳组分在土壤碳排放变异中的重要性,进一步解释土壤碳循环过程中的机理。在本试验中,土壤碳排放与土壤活性有机碳库组分呈极显著的相关性,这与胡诚等[59]在华北地区得出的土壤基础呼吸与土壤微生物量碳、可溶性有机碳呈极显著相关性结论基本一致,而陈旸等[60]的研究则表明,水稻土基础呼吸与微生物量碳没有显著相关关系,推测可能由于土壤类型的差异所致。土壤碳排放量与易氧化有机碳含量相关性最高,其次是微生物量碳,与水溶性有机碳相关性最低,推测可能是由于微生物在利用碳源时的顺序差异所致,Kuzyakov等[61-62]认为土壤微生物活性或微生物量增加可以刺激土壤有机碳的转化,如果土壤中同时存在几种有机质,微生物会优先分解利用率高的有机质,本试验中土壤碳排放量与各碳库组分之间相关性并不一致,也间接证实了Kuzyakov等的观点。

土壤碳排放与土壤酶之间的关联是土壤物质与能量循环转化过程中各种碳源与土壤微生物呼吸的内在关系的映射,这些研究可以为农业生产中的平衡施肥有一定的指导和借鉴意义[50]。有关土壤呼吸与土壤酶活性关系的研究目前结论尚不统一[63-64],本试验中土壤碳排放与BG、CBH、NAG、BXYL酶活性均呈极显著相关,这与Gispert等[65]在西班牙对不同土地利用方式下土壤呼吸与土壤酶活性关系的研究结论一致,即土壤呼吸与土壤β-葡萄糖苷酶、蛋白酶和磷酸酶都有显著正相关关系。李化山等[66]研究表明土壤呼吸与土壤β-葡萄糖苷酶、木聚糖酶没有显著相关性,这可能由作物类型、生育期或者田间管理措施的差异引起,因此,有关土壤酶活性与土壤呼吸的关系还需进一步的研究。

4 结论

本试验中得出在东北地区,各种施肥处理均可以显著增加黑土土壤碳排放量(P<0.05),与不施肥相比,

长期有机无机配施能够显著增加土壤碳排放量 71.81%—88.51%,效果最为明显;长期秸秆还田处理显著增加土壤碳排放量 56.32%,长期单施化肥处理碳排放量约为 2633.33 kg,显著高出 37.36%;长期有机无机配施能够显著提高土壤活性碳库组分含量与土壤酶活性($P<0.05$);土壤碳排放与土壤活性碳库各组分以及土壤 β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase)、木聚糖酶(β-xylosidase)、纤维素酶(Cellobiohydrolase)和乙酰基 β-葡萄糖胺酶(N-acetylglucosaminnidase)活性呈极显著相关($P<0.001$),说明施肥通过改变土壤呼吸底物浓度与微生物活性影响土壤碳排放,此结论能够为东北黑土地区的合理的农田管理提供一定的理论支撑。但是,长期不同施肥下的土壤碳排放差异较大,有机肥还田虽然能够显著增加土壤固碳潜力,但其造成的农田温室气体排放量增加也不可忽视。农田作物参与并深刻的影响土壤碳循环,但是作物生长与土壤呼吸底物和土壤微生物活性的关系还缺乏系统的研究,有关不同施肥措施下作物对土壤呼吸的影响机制可以作为今后农田生态系统碳循环研究的重点。

参考文献(References):

[1] 黄承才, 葛滢, 常杰, 卢蓉, 徐青山. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. 生态学报, 1999, 19(3): 324-328.

[2] Marland G, Rotty R M. Carbon dioxide emissions from fossil fuels: A procedure for estimation and results for 1950-1982. Tellus B, 1984, 36(4): 232-261.

[3] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO2 emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 351(6324): 304-306.

[4] Comeau L P, Hergoualc'h K, Hartill J, Smith J, Verchot L V, Peak D, Salim A M. How do the heterotrophic and the total soil respiration of an oil palm plantation on peat respond to nitrogen fertilizer application? Geoderma, 2016, 268: 41-51.

[5] Kéraval B, Lehours A C, Colombet J, Amblard C, Alvarez G, Fontaine S. Soil carbon dioxide emissions controlled by an extracellular oxidative metabolism identifiable by its isotope signature. Biogeosciences, 2016, 13(22): 6353-6362.

[6] 钟杨权威. 长期施氮对旱作麦田土壤碳库平衡及其稳定性影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[7] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态. 生态学报, 2009, 29(5): 2551-2559.

[8] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 韩晓增, 李海波. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028-1035.

[9] 林而达. 气候变化与农业可持续发展. 北京: 北京出版社, 2001: 1-32.

[10] 张前兵. 干旱区不同管理措施下绿洲棉田土壤呼吸及碳平衡研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.

[11] 王晶, 解宏图, 朱平, 李晓云. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述. 生态学杂志, 2003, 22(6): 109-112.

[12] Qi R M, Li J, Lin Z A, Li Y T, Yang X D, Zhang J J, Zhao B Q. Temperature effects on soil organic carbon, soil labile organic carbon fractions, and soil enzyme activities under long-term fertilization regimes. Applied Soil Ecology, 2016, 102: 36-45.

[13] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, Li H W, Fan M S, Kuzyakov Y. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in loess plateau of China. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 85-94.

[14] Liu E K, Chen B Q, Yan C R, Zhang Y Q, Mei X R, Wang J B. Seasonal changes and vertical distributions of soil organic carbon pools under conventional and no-till practices on Loess Plateau in China. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(2): 517-526.

[15] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 王维, 侯贤清, 杨保平, 李永平. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.

[16] 张迪, 韩晓增, 侯雪莹. 长期不同施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响. 土壤通报, 2011, 42(3): 654-658.

[17] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, Hu T X, Gong Y B. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China. Geoderma, 2009, 149(3/4): 318-324.

[18] Liu E K, Yan C R, Mei X R, Zhang Y Q, Fan T L. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in northwest China. PLoS One, 2013, 8(2): e0056536.

[19] 焦晓光, 魏丹. 长期培肥对农田黑土土壤酶活性动态变化的影响. 中国土壤与肥料, 2009, (5): 23-27.

[20] 曹凑贵, 李成芳, 展茗, 汪金平. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响. 中国农业科学, 2011, 44(1): 93-98.

[21] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, Smith C J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(2): 273-284.

[22] 宋震震. 不同施肥制度下潮土活性有机碳库的温变响应[D]. 济南: 山东农业大学, 2014.

[23] 陈欢, 李玮, 张存岭, 乔玉强, 杜世州, 赵竹, 曹承富. 淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应. 中国农业科学, 2013, 47(3): 495-502.

[24] 李芳, 信秀丽, 张丛志, 宁琪, 赵金花, 吴其聪, 赵占辉, 蔡太义, 聂广森, 张佳宝. 长期不同施肥处理对华北潮土酶活性的影响. 生态环境学报, 2015, 24(6): 984-991.

[25] 仪明媛, 彭畅, 张会民, 张文菊, 汪怀建, 徐明岗. 长期施肥下黑土活性有机碳变化特征. 土壤通报, 2012, 43(5): 1139-1144.

[26] 曾希柏, 陈同斌, 胡清秀, 林忠辉. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异. 地理学报, 2002, 57(5): 539-546.

[27] 刘鸿翔, 王德禄, 王守宇, 张璐, 沈善敏. 施肥制度改革对粮食生产发展贡献. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(4): 260-262.

[28] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波. 长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究. 土壤学报, 2009, 46(3): 520-525.

[29] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 张昊青. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451.

[30] Qiu J J, Wang L G, Tang H J, Li H, Chang S. Studies on the situation of soil organic carbon storage in croplands in northeast of China. Agricultural Sciences in China, 2005, 4(8): 594-600.

[31] Liu E K, Yan C R, Mei X R, Zhang Y Q, Fan T L. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in northwest China. PLoS One, 2013, 8(2): e56536.

[32] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. Nature, 2001, 413(6856): 622-625.

[33] Bhargava A, Carmona F F, Bhargava M, Srivastava S S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. Journal of Environmental Management, 2012, 105: 103-120.

[34] Lee J H. An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(3): 431-439.

[35] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 117-141.

[36] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展. 土壤, 2005, 37(3): 258-264.

[37] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1180-1186.

[38] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. Nature, 2009, 462(7274): 795-798.

[39] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 董文旭, 王玉英, 宋利娜. 农田土壤主要温室气体(CO_2, CH_4, N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.

[40] 赵光影, 刘景双, 王洋, 窦晶鑫. CO_2浓度升高对三江平原典型湿地土壤活性有机碳的影响. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 84-86, 90-90.

[41] 黄晶, 李冬初, 刘淑军, 刘宏斌, 王伯仁. 长期施肥下红壤旱地土壤 CO_2 排放及碳平衡特征. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 602-610.

[42] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 杨兆芳, 郑循华. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响. 环境科学, 2004, 25(3): 1-6.

[43] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. Advances in Agronomy, 2005, 85, 221-268.

[44] 卜洪震, 王丽宏, 尤金成, 肖小平, 杨光立, 胡跃高, 曾昭海. 长期施肥管理对红壤稻田土壤微生物量碳和微生物多样性的影响. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3340-3347.

[45] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响. 中国农业科学, 2010, 44(17): 3565-3574.

[46] Liu E K, Teclemariam S G, Yan C R, Yu J M, Gu R S, Liu S, He W Q, Liu Q. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China. Geoderma, 2014, 213, 379-384.

[47] Rudrappa L, Purakayastha T J, Singh D, Bhadraray S. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 180-192.

[48] Saha S, Prakash V, Kundu S, Kumar N, Mina B L. Soil enzymatic activity as affected by long term application of farm yard manure and mineral fertilizer under a rainfed soybean-wheat system in N-W Himalaya. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(3): 309-315.

[49] Von Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(3): 216-220.

[50] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 张旭东, 邹德乙, 刘小虎. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响. 土壤通报, 2006, 37(2): 263-267.

[51] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 林先贵, 陈瑞蕊, 钦绳武. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响. 生态环境, 2007, 16(1): 191-196.

[52] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 徐晶, 张夫道. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.

[53] 牛文静, 李恋卿, 潘根兴, 宋祥云, 李志鹏, 刘晓雨, 刘永卓. 太湖地区水稻土不同粒级团聚体中酶活性对长期施肥的响应. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2181-2816.

[54] 唐玉姝, 慈恩, 颜廷梅, 魏朝富, 杨林章, 沈明星. 长期定位施肥对太湖地区稻麦轮作土壤酶活性的影响. 土壤, 2008, 40(5): 732-737.

[55] 俞慎, 李勇, 王俊华, 车玉萍, 潘映华, 李振高. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. 土壤学报, 1999, 36(3): 413-422.

[56] 张电学, 韩志卿, 王介元, 陈洪斌. 燕山山麓平原高产粮区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 6(3): 267-272.

[57] Gredener B, Tippkötter R. Effect of rice straw application on hydrolytic enzyme activities in Chinese paddy soils//Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia: International Union of Soil Sciences, 2010: 13-16.

[58] Perucci P, Scarponi L. Effect of different treatments with crop residues on soil phosphatase activity. Biology and Fertility of Soils, 1985, 1(2): 111-115.

[59] 胡诚, 曹志平, 胡婵娟, 王金凯. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及基础呼吸的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 63-66.

[60] 陈旸, 李忠佩, 周立祥, 车玉萍, 王兴祥. 不同施肥处理对红壤水稻土微生物生物量及呼吸强度的影响. 土壤, 2008, 40(3): 437-442.

[61] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11-12): 1485-1498.

[62] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(4): 747-758.

[63] Baena C W, Andrés-Abellú M, Lucas-Borja M E, Martínez-García E, García-Morote F A, Rubio E, López-Serrano F R. Thinning and recovery effects on soil properties in two sites of a Mediterranean forest, in Cuenca Mountain (South-eastern of Spain). Forest Ecology and Management, 2013, 308: 223-230.

[64] 李雅红, 江洪, 原焕英, 刘源月, 周国模, 余树全. 西天目山毛竹林土壤呼吸特征及其影响因子. 生态学报, 2010, 30(17): 4590-4597.

[65] Gispert M, Emran M, Pardini G, Doni S, Ceccanti B. The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. Geoderma, 2013, 202-203: 51-61.

[66] 李化山, 汪金松, 刘星, 蒋思思, 张春雨, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应. 环境科学学报, 2014, 34(1): 238-249.